

Apresentação de uma Nova Técnica para Avaliação de Ensaios de Resistência no Auxílio de Estudos Probabilísticos de Estabilidade de Taludes

Luiz Eduardo Monteiro Marcelino

GeoFast Treinamento e Consultoria Empresarial Ltda., Ouro Preto, Brasil,
eduardomonteiro_m@hotmail.com

Saulo Gutemberg Silva Ribeiro

GeoFast Treinamento e Consultoria Empresarial Ltda., Ouro Preto, Brasil,
saulogft@hotmail.com

Resumo: As análises de estabilidade de taludes desenvolvidas na prática de Engenharia Geotécnica são predominantemente do tipo determinística, em que as condições de estabilidade são representadas pelo valor do fator de segurança calculado pelos diversos métodos disponíveis (Morgenstern-Price, Bishop, Jambu, Fellenius, etc.). Por outro lado, os métodos probabilísticos, que ainda não têm sido amplamente utilizados, são uma forma de contemplar as incertezas existentes e baseiam-se em princípios dos métodos determinísticos. Sendo assim, este trabalho propõe uma metodologia de tratamento estatístico de dados de ensaios de compressão triaxial com a finalidade de construir as curvas de distribuição dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) a aplicá-las em análises probabilísticas de estabilidade de taludes. As curvas de distribuições foram aplicadas a uma seção operacional de lavra a céu aberto e os resultados foram comparados aos valores sugeridos na literatura. Para o talude global, que possuía de 150 metros de altura, o fator de segurança determinístico encontrado foi de 1,29, muito próximo ao recomendado (1,30); além disso, a probabilidade de ruptura encontrada foi de 6,5%, que está dentro do limite recomendado entre 5% e 10% para os critérios adotados.

PALAVRAS-CHAVE: Mineração, Análise probabilística, Estabilidade de taludes, Método de Monte-Carlo.

1 INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade de taludes é amplamente realizada a partir de métodos determinísticos, que contemplam valores médios dos parâmetros de entrada do estudo. Essa quantificação do comportamento é traduzida por meio do fator de segurança FS encontrado para o talude e esse valor será tanto mais representativo da realidade quanto menor forem as incertezas acerca dos parâmetros dos materiais envolvidos.

Por outro lado, a adoção de métodos probabilísticos de estabilidade de taludes pode minimizar as diversas formas de incertezas

existentes. Esses métodos fornecem, além do valor de FS, valores estatísticos acerca da probabilidade de ruptura da estrutura e requerem a identificação dos parâmetros que serão abordados como aleatórios e também da quantificação estatística de sua variabilidade.

Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho é propor uma metodologia de tratamento estatístico dos resultados dos diversos ensaios de compressão triaxial em um mesmo domínio geotécnico, a fim de se obter a forma e a quantificação da variabilidade c' e ϕ' . Além disso, é proposta a aplicação dessas curvas de distribuição em uma seção operacional de lavra a céu aberto, realizando a

análise probabilística de estabilidade de seus taludes e comparando os resultados encontrados com os valores recomendados na literatura.

2 METODOLOGIA

Serão utilizados resultados de múltiplos ensaios triaxiais de um mesmo domínio geotécnico para prever a distribuição de c' e ϕ' . A metodologia proposta é a combinação dos resultados desses ensaios, como segue: a partir de N ensaios triaxiais realizados para um mesmo domínio geotécnico, realizados sob 4 níveis de tensão de confinamento, obtém-se um valor c' e outro de ϕ' para cada combinação possível dos pontos do diagrama p - q dos N ensaios, de modo a gerar NC envoltórias de ruptura distintas.

A análise combinatória mostra que o número de combinações NC de diagramas p - q possíveis para N ensaios com quatro níveis de tensão é dado por:

$$NC = N^4 \quad (1)$$

Seja, a título de ilustração, cinco ensaios triaxiais disponíveis para um dado material, todos eles com quatro níveis de tensão confinante, por exemplo, 50, 100, 200 e 400 kPa. Com os métodos convencionais de interpretação de ensaios triaxiais, poder-se-ia encontrar cinco valores de c' e cinco de ϕ' . No entanto, com a metodologia proposta, os pontos de ruptura dos cinco constituiriam 625 valores de c' e ϕ' (Equação 1, com N igual a 5), já que o diagrama p - q seria construído com pontos de ruptura de diferentes ensaios. O único critério a ser respeitado na construção do diagrama p - q seria a existência de um ponto para cada tensão confinante as quais o ensaio foi realizado.

Em posse desses dados, será realizada a estabilidade de talude por meio do programa SLOPE/W, da plataforma GeoStudio 2012. Será realizada, por fim, uma comparação desses resultados com os valores recomendados para a atividade de mineração, tanto para os estudos determinísticos (valores de FS), quanto para os estudos probabilísticos (probabilidade de ruptura).

3 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

3.1 Domínios Geotécnicos

O tratamento estatístico dos dados desenvolvido foi realizado com base em campanhas de ensaios de compressão triaxial realizados para os seguintes domínios geotécnicos, a saber: Aloterita Vermelha; Aloterita Amarela; Micáceo de Topo; Micáceo de Base e Oxidado Terroso.

Os ensaios realizados foram do tipo CU, sendo alguns com a amostra totalmente saturada e outros com a amostra em umidade natural. Para cada um dos domínios geotécnicos existentes dispuseram-se de cinco ensaios triaxiais, sendo dois com a amostra na umidade natural (ensaios Nat) e três com a amostra saturada (ensaios Sat), com exceção do domínio Micáceo de Topo, em que se dispuseram de apenas três ensaios (dois com a amostra na umidade natural e um com a amostra saturada).

A título de exemplificação, a Figura 1 os pontos de ruptura dos ensaios de compressão triaxial disponíveis do domínio geotécnico Aloterita Vermelha, a saber: AV Nat 01, AV Nat 02, AV Sat 01, AV Sat 02 e AV Sat 03 (em que Nat significa ensaio com amostra na umidade natural e Sat, amostra saturada).

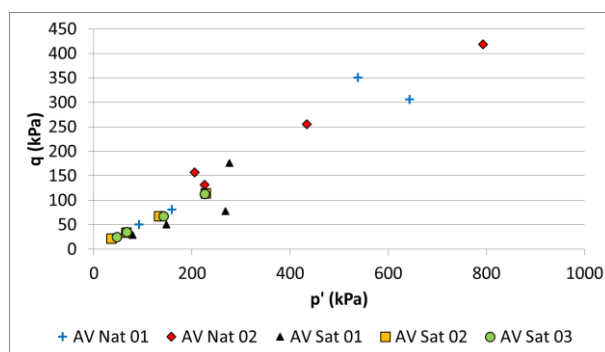


Figura 1. Pontos de ruptura dos ensaios triaxiais da Aloterita Vermelha.

Todos os ensaios triaxiais disponíveis possuem quatro diferentes níveis de tensão (50, 100, 200 e 400 kPa). Fez-se, então, para cada um dos domínios geotécnicos, a combinação dos pontos da trajetória de tensão efetiva, a fim de se obter as curvas de distribuição de c' e ϕ' .

Para os materiais com 5 ensaios de compressão disponíveis, cada um com 4 níveis

de tensão, de acordo com a equação 1, têm-se 625 trajetórias de tensões efetiva. Para exemplificar o procedimento adotado nesse trabalho, a Figura 2 a mostra uma dessas trajetórias, do domínio geotécnico Aloterita Vermelha.

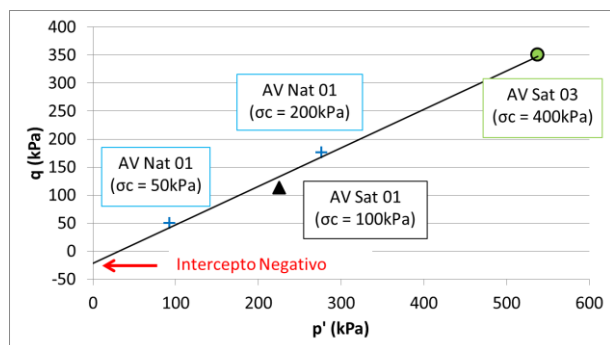


Figura 2. Pontos de ruptura de quatro distintos níveis de tensão.

Como se pode notar, os pontos de ruptura dos para cada nível de tensão são mostrados na Figura 2 é composta pelos pontos do ensaio com a amostra na umidade natural AV Nat 01, AV Sat 01 e AV Sat 03 com os respectivos níveis de tensão de confinamento (σ_c). Nota-se também que essa trajetória de tensão efetiva apresenta o intercepto de coesão negativo.

Esses cenários de intercepto negativo podem ser explicados por alguma discrepância nos resultados em alguns dos corpos de prova ensaiados, o que faria com que esse resultado interfira nos diagramas p - q em que esse resultado esteja contido.

Nesse trabalho, sempre que o intercepto de coesão se apresentou negativo, adotou-se o critério que consiste em transladar a trajetória de tensão, tornando-a de intercepto nulo e mantendo a inclinação constante. A Figura 3 ilustra o critério descrito.

Além disso, um estudo adicional com a eliminação dos valores c' e ϕ' que foram obtidos a partir de envoltórias de ruptura com intercepto coesivo negativo foi realizado. Nesse estudo adicional, verificou-se que os resultados finais não variaram de maneira significativa. Isso se deve, sobretudo, devido ao fato de que apenas uma pequena parcela de envoltórias de ruptura (menos de 5%) apresentaram essa anomalia.

Da mesma forma, devido a baixa frequência de envoltórias com intercepto nulo, qualquer

outra técnica de tratamento dessas envoltórias, como, por exemplo, a alteração de ϕ' até que c' se torne igual a zero, não iria interferir de maneira significativa no resultado final.

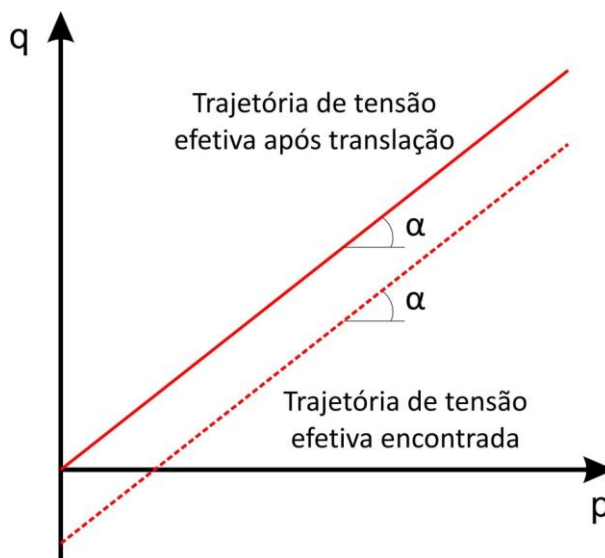


Figura 3. Translação da trajetória de tensão efetiva.

Após o tratamento dos resultados dos ensaios de compressão triaxial, obtiveram-se as curvas de distribuição dos parâmetros de resistência c' e ϕ' , bem como as medidas de tendência central e de variação dessas variáveis.

As tabela 1 e 2 resumem os resultados encontrados para a coesão e para o ângulo de atrito, respectivamente. O coeficiente de variação é definido pela razão entre o desvio-padrão e a média.

Tabela 1. Resumo dos resultados obtidos para a coesão.

Domínio Geotécnico	Média	Coesão (kPa)	
		Desvio-padrão	Coeficiente de variação
Aloterita V.	8	14	176%
Aloterita A.	30	39	129%
Micáceo T.	22	28	125%
Micáceo B.	29	39	135%
Oxidado T.	24	17	70%

Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos para o ângulo de atrito.

Domínio Geotécnico	Média	Ângulo de Atrito (kPa)	
		Desvio-padrão	Coeficiente de variação
Aloterita V.	26	5	20%
Aloterita A.	29	5	17%
Micáceo T.	24	6	27%
Micáceo B.	27	6	22%
Oxidado T.	26	3	10%

Nota-se que o desvio padrão e o coeficiente de variação da coesão apresentaram-se mais elevados que o ângulo de atrito. Esse comportamento já era esperado, na medida em que a coesão tende a ser um parâmetro de maior variabilidade, quando comparada ao ângulo de atrito.

Em termos gerais, os ensaios de compressão triaxial a baixos níveis de tensão são mais representativos e adequados para quantificar a coesão. Sendo assim, é provável que a existência de ensaios a níveis de tensão de 400kPa possa ter influenciado na variabilidade desse parâmetro.

Outro fator que pode ter influenciado na grande variabilidade da coesão é a existência de ensaios realizados com a amostra na umidade natural. Esses ensaios tendem a apresentar parâmetros de resistência mais elevados devido à atuação da sucção mátrica, que eleva a tensão efetiva e, conseqüentemente, amplifica a resistência ao cisalhamento.

4 SEÇÃO DE ESTUDO

A seção (Figura 4) adotada possui dois dos cinco domínios geotécnicos utilizados neste trabalho (Aloterita Vermelha e Aloterita Amarela), assentes sobre camadas de Rocha Alterada e Rocha São. Além disso, a seção apresenta um nível d'água que demonstra uma tendência de acompanhar a superfície.

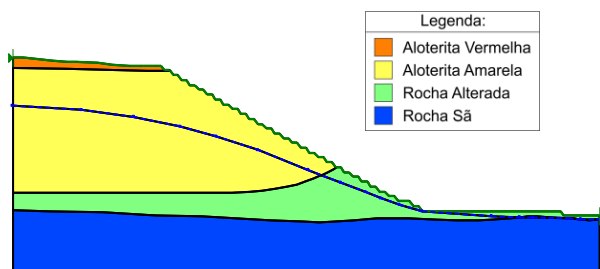


Figura 4. Seção utilizada no estudo.

A Figura 5 mostra as dimensões global e de bancada da seção em estudo. Nota-se que a altura do talude global dessa seção é 150m, com inclinação de 34°, já todas as bancadas possuem dimensões constantes, com largura e altura de 5m e inclinação de 53°.

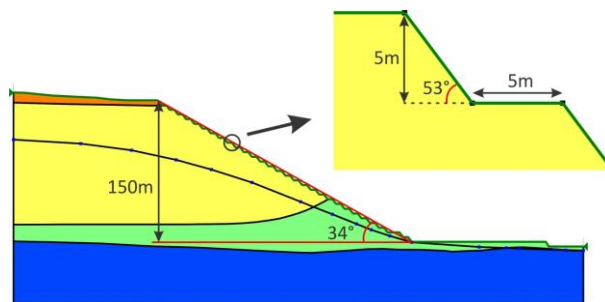


Figura 5. Dimensões da seção utilizada.

Os parâmetros de resistência dos materiais Rocha Alterada e Rocha São foram obtidos por correlações que fogem ao escopo desse trabalho e estão mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, juntamente aos pesos específicos de cada um dos materiais existentes nessa seção. Além disso, têm-se os valores médios de c' e ϕ' para a Aloterita Vermelha e Aloterita Amarela.

Tabela 3. Parâmetros de resistência.

Domínio Geot.	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Aloterita V.	17,5	8*	26*
Aloterita A.	19,0	30*	29*
Rocha Alterada	24,0	50	42
Rocha São	27,0	17000	46

*Valores médios das respectivas curvas de distribuição.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados

Foram realizadas análises probabilísticas e determinísticas de estabilidade de talude global, de inter-rampa e de bancada da seção adotada. As análises foram realizadas com a utilização do programa Slope/W com o método rigoroso de Morgenstern-Price. O sistema Slope/W adota a método de Monte Carlo em suas análises probabilísticas com um padrão de 2000 combinações, sendo esse padrão mantido neste trabalho.

As figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, a análise de estabilidade determinística e a distribuição dos fatores de segurança para o talude global. Os resultados para os demais taludes estão listados na Tabela 4.

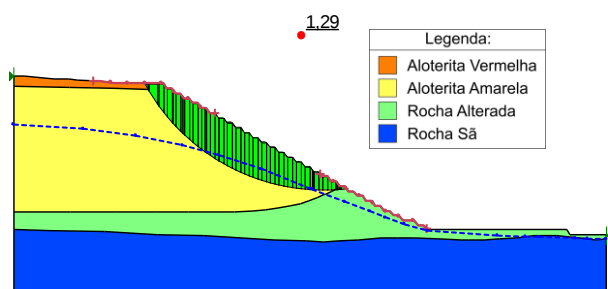


Figura 6. Análise de estabilidade do talude global.

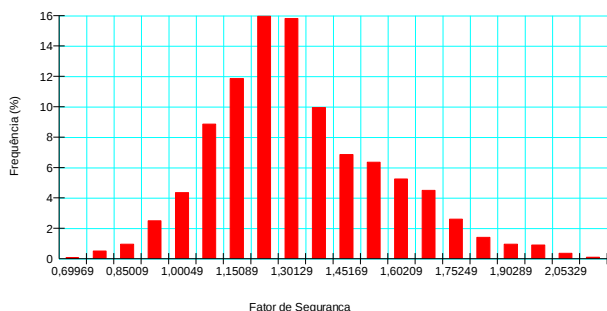


Figura 7. Histograma dos fatores de segurança encontrados para o talude global.

Tabela 4. Fatores de segurança e probabilidades de ruptura encontrados.

Tipo de Talude	FS _{Estático}	Prob. Rup. (%)
Global	2,75	3,0%
Inter-rampa	1,40	5,2%
Local	1,29	6,5%

5.2 Discussão

Os resultados encontrados neste trabalho podem ser comparados aos valores recomendados na literatura para taludes de mina a céu aberto. Segundo Read (2009), tanto os valores aceitáveis do fator de segurança estático como de probabilidade de ruptura estão relacionados com o tipo de talude (de bancada, inter-rampa e global) e com o tipo de consequência (baixa, média ou alta) que sua ruptura implicará. Os valores propostos por Read (2009) estão listados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de probabilidade de ruptura recomendados em mineração, adaptado de Read (2009).

Talude	Consequência da ruptura	FS _{Estático}	Prob. Rup. (%)
Bancada	Baixa-Alta	1,1	15-50%
Inter-rampa	Baixa	1,15-1,2	25%
	Média	1,2	20%
	Alta	1,2-1,3	10%
Global	Baixa	1,2-1,3	15-20%
	Média	1,3	5-10%
	Alta	1,3-1,5	≤5%

Ao se comparar os resultados encontrados da Tabela 4 com os recomendados da Tabela 5, nota-se que, para o talude global, tanto o fator de segurança estático (1,29), quanto à probabilidade de ruptura (6,5%) estão bastante consistentes com o proposto na literatura, se considerado uma consequência média na ruptura.

Entretanto, nota-se que os valores encontrados para o talude de inter-rampa e de bancada são bastantes conservadores se comparados aos limites da Tabela 5. Esse fato por estar relacionado à impossibilidade de otimização do plano de lavra para o talude de bancada e de inter-rampa a fim de manter o a estabilidade do talude global.

Além disso, de acordo com a Tabela 3, a coesão média para o material Aloterita Amarela encontrada é 30kPa, valor que pode ser considerado elevado para um talude de 5 metros de altura, uma vez que é a coesão é o parâmetro preponderante na a resistência ao cisalhamento de taludes de baixas alturas.

6 CONCLUSÕES

A proposta de tratamento estatístico dos ensaios triaxiais dos domínios geotécnicos disponíveis resultou em curvas de distribuição para o ângulo de atrito com valores de coeficiente de variação entre 10% e 27%. Entretanto, para a coesão os valores do coeficiente de variação se apresentaram bastante elevados (acima de 100%) o que pode ser explicado pela existência de ensaios do tipo CU com a amostra saturada e na umidade natural.

Além disso, os valores encontrados na análise de estabilidade de taludes realizada a partir das curvas de distribuição obtidas se mostraram bastantes consistentes para o talude global da seção, se comparado com os valores propostos por Read (2009), tanto para o estudo determinístico, quanto para o probabilístico.

Entretanto, os resultados para os taludes de bancada e de inter-rampa se mostraram conservadores, fato que, conforme já foi discutido no capítulo anterior, pode ter sido causado pela impossibilidade de otimização desses taludes para preservar a estabilidade

global e também pelo valor considerável da coesão da Aloterita Amarela (30kPa), uma vez que a coesão possui grande influência na estabilidade de taludes de pequenas dimensões.

REFERÊNCIAS

- COSTA, E. A. Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes. 2005. 160 f. Dissertação de Mestrado. Escola de engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.
- FLORES, E. A. F. Análises probabilísticas da estabilidade de taludes considerando a variabilidade do solo. 2008. 178 f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008.
- GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. Stability modeling with SLOPE/W. Calgary, Canadá, 2012. 238 p.
- LARSON, R.; FARBER, B. Estatística aplicada. 4ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 638 p.
- MAYER, P. L. Probabilidade aplicações à estatística. 2ª edição. Washington, Estados Unidos: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1965. 426 p.
- READ, J.; STACEY, P. Guidelines for open pit slope design. Collingwood, Austrália: Csiro Publishing, 2009. 495p.
- REZENDE, D. A. Análise probabilística de estabilidade de taludes em barragens de rejeitos. 2013. 97 f. Projeto de graduação. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2013.